
Praktično digitalno upravljanje zasnovano na PID kontroli

Sa Raspberry Pi i Arduino Uno



Dogan Ibrahim

Agencija Eho
www.infoelektronika.net

- Sva prava zadržana. Nijedan deo ove knjige ne sme biti reprodukovan u bilo kom materijalnom obliku, uključujući fotokopiranje ili slučajno ili nenamerno smeštanje na bilo koji elektronski medijum sa ili uz pomoć bilo kog elektronskog sredstva, bez pismenog odobrenja nosioca autorskih prava osim u skladu sa odredbama zakona o autorskim pravima, dizajnu i patentima iz 1988. godine ili pod uslovima izdatim od Copyright Licensing Agency Ltd, 90 Tottenham Court Road, London, England W1P 9HE. Prijave za pismene dozvole radi štampanja bilo kog dela ove publikacije upućuje se izdavaču ove knjige.

- Izjava: Autor i izdavač su uložili najveće napore da bi se obezbedila tačnost informacija sadržanih u ovoj knjizi. Autor i izdavač ne mogu da pretpostave neprijatnosti i ovom izjavom isključuju bilo kakvu odgovornost za bilo koju stranku koja bi imala gubitke ili štetu uzrokovanu greškama ili propustima u ovoj knjizi, bez obzira da li su greške ili propusti nastali usled nemara, nezgode ili bilo kog drugog razloga.

Praktično digitalno upravljanje zasnovano na PID kontroli

ISBN 978-86-80134-44-4

Naslov originala: PID-based Practical Digital Control

Autor: Dogan Ibrahim

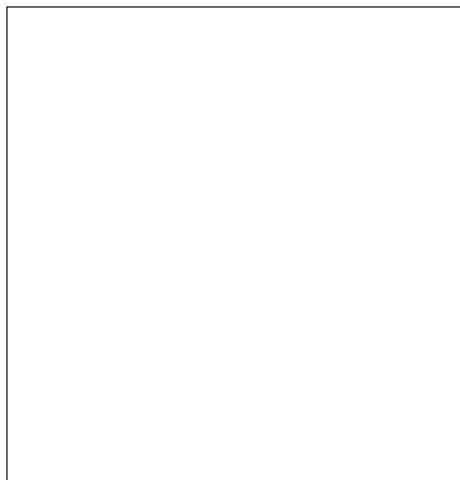
Prevod: Voloda Pezo

Izdaje i štampa: Agencija Eho, Niš

e-mail: redakcija@infoelektronika.net

Tiraž: 200

Godina izdanja: 2022



Predgovor	9
Poglavlje 1 – Kontrolni sistemi (upravljački sistemi)	11
1.1 Otvorena petlja i zatvorena petlja	11
1.2 Mikrokontroler u petlji	12
1.3 Dizajn kontrolnih sistema	15
Poglavlje 2 - Senzori	16
2.1 Senzori kod računarske kontrole	16
2.2 Temperaturni senzori	18
2.2.3 Analogni temperaturni senzori	18
2.2 Digitalni temperaturni senzori	25
2.3 Senzori pozicije	26
2.4 Senzori brzine i ubrzanja	28
2.5 Senzori sile	30
2.6 Senzori pritiska	30
2.7 Senzori tačnosti	32
Poglavlje 3 – Prenosne funkcije i vremenski odziv	37
3.1 Pregled	37
3.2 Sistemi prvog reda	37
3.2.1 Vremenski odziv	39
3.3 Sistemi drugog reda	43
3.3.1 Vremenski odziv	45
3.4 Vremensko kašnjenje	50
3.5 Prenosna funkcija sistema sa zatvorenom petljom	51
Poglavlje 4 - Digitalni sistemi sa diskretnim vremenom	53
4.1 Pregled	53
4.2 Postupak uzorkovanja	53
4.3 Z transformacija	57
4.3.1 Hevisajdova funkcija	57
4.3.2 Jedinična funkcija rampe	58
4.3.3 Tabele z-transformacije	58
4.4 Z-transformacija funkcije izražene Laplasovom transformacijom	58
4.5 Inverzna z-transformacija	60
4.6 Impulsna prenosna funkcija i manipulacija blok dijagramima	61
4.6.1 Sistemi sa otvorenom petljom	62

4.7 Vremenski odziv za otvorenu petlju	63
4.8 Vremenski odziv za sistem sa zatvorenom petljom	67
Poglavlje 5 - PID regulator u sistemima sa kontinualnim vremenom	69
5.1 Pregled	69
5.2 Sistem prvog reda samo sa proporcionalnom regulacijom	70
5.3 Sistem prvog reda samo sa integralnom regulacijom	71
5.4 Regulacija sistema prvog reda samo sa funkcijom derivacije	72
5.5 Proporcionalna i integralna regulacija sa sistemom prvog reda	73
5.6 Proporcionalna, integralna i derivativna regulacija sistema prvog reda	74
5.7 Dejstva na promenu PID parametara	75
5.8 Podešavanje PID regulatora	76
5.8.1 Zigler Nikols podešavanje za otvorenu petlju	77
5.8.2 Koen Kun PID podešavanje sistema sa otvorenom petljom	78
5.8.3 Podešavanje sistema sa zatvorenom petljom	82
5.8.4 Praktično podešavanje PID-a	84
5.9 Automatsko podešavanje PID regulatora	85
5.10 Povećanje i smanjenje PID parametara	85
5.11 Zasićenje i integralni premašaj	85
5.12 Derivativni trzaj	86
5.13 Upotreba simulatora PID petlje	86
Poglavlje 6 – Digitalni PID regulator	88
6.3 Pregled	88
6.2 Digitalni PID	88
6.3 Izbor vremena uzorkovanja T	89
6.4 Mikrokontrolerska implementacija PID algoritma	90
Poglavlje 7 - Kontrola temperature On/Off	92
7.1 Pregled	92
7.2 Temperaturni kontroleri	92
7.3 Projekt 1: On/Off temperaturna kontrola sa Arduino uno	93
7.4 Projekt 2: ON-OFF kontrola temperature sa histerezom na Arduino Uno	98
7.5 Projekt 3: ON-OFF kontrola temperature sa tasterom za Arduino Uno	100
7.6 Projekt 4: ON-OFF kontrola temperature sa obrtnim dekodeom za Arduino Uno	103

Poglavlje 8 – PID kontrola temperature sa raspberry Pi	118
8.1 Pregled.....	118
8.2 Projekt 1 – Očitavanje temperature sa termistora	118
8.3 Projekt 2 – Vremenski odziv odskočne funkcije za otvorenu petlju	122
8.4 Projekt 3: PI kontrola temperature	129
8.5 Projekat 4: PID temperaturna kontrola	135
Poglavlje 9 – PID kontrola temperature sa Arduino Uno	143
9.1 Pregled.....	143
9.2 Projekt 1 – Očitavanje temperature sa termistora	143
9.3 Projekt 2: PID kontrola temperature	145
9.4 Projekt 3: PID regulacija temperature sa Arduino Uno i vremenskim prekidima	151
Poglavlje 10 – Kontrola jednosmernog (DC) motora sa Arduino i Raspberry Pi	159
10.1 Pregled.....	159
10.2 Tipovi električnih motora.....	159
10.3 DC motori sa četkicama	160
10.3.1 BDC motori sa permanentnim magnetom	160
10.3.2 Serijski namotaji BDC motora.....	161
10.3.3 BDC motori sa šant (paralelnim) namotajima	162
10.3.4 Složeno namotan BDC motor	162
10.3.5 Odvojeno pobuđeni BDC motori	162
10.3.6 Servo motori	163
10.3.7 Koračni motori	163
10.4 Brašles motori - Motori bez četkica.....	164
10.5 Izbor motora	164
10.6 Prenosna funkcija DC motora sa četkicama.....	165
10.7 DC motor koji se koristi u projektima	167
10.8 Projekt 1: Kontrola brzine i smera uz pomoć integrisanog kola sa H-mostom.....	169
10.9 Projekt 2: Prikaz brzine motora sa Arduino Uno.....	176
10.10 Projekt 3: Prikaz brzine motora na LCD sa Arduino Uno	180
Projekt 4: Prikaz brzine motora sa Raspberry Pi	183
10.12 Projekt 5: Prikaz brzine motora na LCD sa Raspberry Pi	185
10.13 Projekt 6: Identifikacija DC motora sa Raspberry Pi	187
10.14 Projekt 7: PID kontrola brzine motora sa Raspberry Pi.....	190
10.15 Projekat 8 PID kontrola brzine motora sa Arduino Uno	194

Poglavlje 11 – Kontrola nivoa vode	198
11.1 Pregled	198
11.2 Modul ultrazvučnog para predajnik – prijemnik	198
11.3 Projekat Merenje rastojanja korišćenjem ultrazvučnog modula HC-SR04 sa Arduino Uno	198
11.4 Projekt 2: Merenje rastojanja ultrazvučnim modulom HC-RSD04 sa Raspberry Pi	202
11.5 Projekt 3: Odziv na ulaznu odskočnu funkciju sistema sa Raspberry Pi	205
11.6 Projekt 4: Kontrola nivoa vode na osnovu PID algoritma na Raspberry Pi	209
11.7 Projekt 5: PID kontrola nivoa vode sa Arduino Uno	214
 Poglavlje 12 – Kontrola sjajnosti LED uz pomoć PID-a	218
12.1 Pregled	218
12.2 Projekt 1: Vremenski odziv za PID kontrolu LED sjajnosti sa Raspberry Pi	218
12.3 Projekat 2: PID bazirana kontrola sjaja LED sa Raspberry Pi	222
12.4 Projekt 3: PID kontrola sjaja LED sa Arduino Uno	227
12.5 Projekt 4: PID kontrola sjaja LED uz pomoć biblioteke Arduino Uno	230

Predgovor

Mikrokontroleri su veoma popularna integrisana kola koja se obično koriste u većini kućnih, komercijalnih kao i industrijskih upravljačkih i nadzornih primena. Procenjuje se da ima više od 50 mikrokontrolera u svakom domu razvijenog sveta. Kućni uređaji imaju ugrađene mikrokontrolere uključujući mikrotalasne peći, štampače, tastature, računare, tablete, veš mašine, mašine za suđe, pametne televizore, telefone i još mnogo toga.

Arduino Uno je mikrokontrolerski razvojni sistem otvorenog koda koji uključuje hardver i integrisano razvojno okruženje (IDE) sa velikim brojem biblioteka. Arduino Uno podržava široka zajednica programera, elektro inženjera, entuzijasta i univerzitetskih krugova. Postoji mnoštvo dizajna osnovnih Arduino Uno pločica. Iako su urađene u nameri da se koriste za različite tipove aplikacija sve mogu biti programirane uopšteno koristeći isti IDE a programi se mogu prenositi između različitih pločica. Ovo je jedan od razloga popularnosti Arduino familije koja je podržana bezbrojnim softverskim bibliotekama za mnoštvo perifernih uređaja koji se lako mogu uključiti u vaše programe. Ove biblioteke čine programiranje lakim i brzim i skraćujući vreme programiranja. Korišćenje biblioteka vam omogućuje lakše testiranje vaših programa jer ih je većina došla potpuno ispitana i u radnom stanju.

Raspberry Pi 4 je jedan od poslednjih popularnih malih računara koji se mogu koristiti u većini aplikacija kao što su audio i video media centri, kao kućni računar, za industrijske kontrolere, robote, igrice i mnoštvo kućnih i komercijalnih aplikacija. Pored bogatog skupa karakteristika koje postoje u ostalim Raspberry Pi računarima, Raspberry Pi 4 nudi Wi-Fi i Bluetooth sposobnosti što ga čini veoma poželjnim za ugradnju kod daljinske i internet kontrole i aplikacija nadzora.

Knjiga je o korišćenju oba sistema Raspberry Pi i Arduino Uno za kontrolne aplikacije zasnovane na PID automatici. Knjiga počinje sa osnovnom teorijom upravljačkih sistema i kontrolom sprege. Radni i ispitani projekti su dati za upravljanje stvarnih sistema koji koriste PID kontrolu. Razmatraju se detaljno vremena odziva otvorene petlje, parametri podešavanja PID-a i vremenski odziv zatvorene petlje razvojnih sistema skupa sa blok dijagramima, električnim šemama, algoritmima PID kontrolera i potpunih listinga programa za Raspberry PI kao i Arduino Uno. Projekti prikazani u knjizi bi teoretski trebalo da vas obuče za primenu PID kontrolera. Lako se mogu izmeniti po želji za druge primene. Projekti dati za Raspberry Pi 4 bi trebalo da rade sa svim ostalim modelima Raspberry Pi familije.

Očekuje se da čitaoci imaju neko programersko iskustvo sa Arduino Uno i korišćenjem Arduino Uno IDE. Isto važi za Raspberry Pi sa programiranjem u programskom jeziku Python 3. Korisno je i neko osnovno iskustvo u hardveru elektronike i osnova matematike.

Svi programi razmatrani u knjizi se nalaze u arhiviranom fajlu koji se može besplatno preuzeti sa Elektorovog veb sajta www.elektor.com/books ili na infoelektronika.net.

Nadam se da ćete uživati čitajući knjigu i istovremeno naučiti teoriju i praksu primene PID kontrolera.

Dogan Ibrahim

London 2022

Poglavlje 1 – Kontrolni sistemi (upravljajući sistemi)

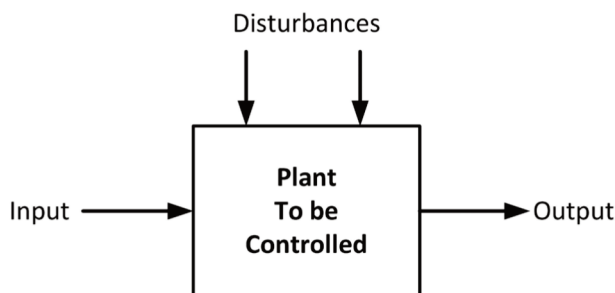
1.1 Otvorena petlja i zatvorena petlja

Upravljački sistemi pokrivaju sve aspekte upravljanja dimačkim sistemima koji se nazivaju fabričkim ili procesnim sistemima. Fabrički mogu biti mehanički sistemi, električni sistemi, termički sistemi, fluidni sistemi ili kombinacija takvih sistema.

Fabrika (pogon) ima jedan ili više ulaza i jedan ili više izlaza. Dinamičko ponašanje pogona (fabrike) je opisano diferencijalnim jednačinama. Na osnovu datih modela (ili diferencijalnih jednačina) ulaza i početnih uslova u pogonu lako možemo izračunati njegove izlaze. Uopšteno rečeno pogon je sistem u nepromenljivom vremenu sa svojim ulazima i izlazima koji su takođe u kontinualnom vremenu. Na primer, elektromagnetni motor je pogon u kontinualnom vremenu čiji ulazi (tj, napon ili struja) i čiji izlaz (brzina ili pozicija) su takođe kontinualni (nepromenljivi) u vremenu.

Upravljački sistemi su zasnovani na sistemima modeliranja, povratne sprege, odziva sistema i stabilnosti. Posledica je da upravljački sistemi nisu ograničeni na samo jednu inženjersku disciplinu nego su jednako primenljivi na mehaničke, hemijske, aeronautičke, građevinske i električarske discipline.

Pogon je normalno u sistemu otvorene petlje (slika 1.1) gde se koristi aktivni uređaj za direktno upravljanje pogonom bez korišćenja povratne sprege. Naprimera, očekuje se da se motor vrti kada se dovede napon na njegove izvođe ali ne znamo brzinu i smer okretanja jer ne postoji informacija na njegovim izlazima. Ako se optereti osovina motora i motor uspori o tome nemamo saznanje. Kao što je dato na slici 1.1 na pogon mogu uticati smetnje koje utiču na njegovo ponašanje a u sistemu otvorene petlje ne postoji način smanjenja takvih smetnji.

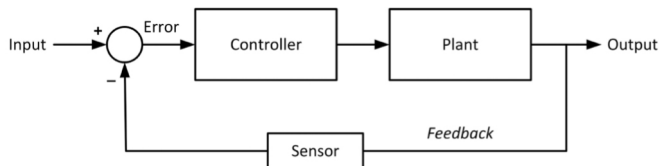


Slika 1.1 Sistem otvorene petlje [smetnje, ulaz, upravljani pogon, izlaz]

Za razliku od sistema otvorene petlje kod upravljačkog sistema zatvorene petlje (slika 1.2) stvarni izlazi iz pogona se mere i upoređuju sa onim što bi želeli da bude na izlazima pogona. Mera izlaza se naziva signal povratne sprege. Razlika između željene vrednosti izlaza i stvarne izlazne vrednosti se naziva signal greške. Signal greške se koristi da prinudi izlaz sistema i dovede u tačku da su vrednosti željenog izlaza i vrednosti stvarnog izlaza jednaki tj. da je signal greške jednak nuli. Prednost upravljanja sa zatvorenom petljom ili kontrolom povratne sprege je mogućnost da se kompenzuju poremećaji (smetnje) i dobije ispravan izlaz čak i u prisustvu smetnji. Tako, izlazi pogona ostaju i zadržavaju željene vrednosti. Na primer kod kon-

trole brzine motora njegova brzina ostaje ista kada se ona optereti. **Kontroler** (ili **kompensator**) se obično koristi da očitava signal greške i pobuđuje pogon na takav način da greška teži nuli.

Senzori su uređaji koji mere izlaz pogona. Na primer, termistor je senzor koji se koristi za merenje temperature pa se može koristiti u zatvorenoj petlji upravljanja termičkog pogona. Slično, tahometar ili enkoder se može koristiti da meri brzinu okretanja motora pa se mogu upotrebiti u aplikacijama upravljanja brzinom motora u sistemu sa zatvorenom petljom. Zapazite da kod električnih sistema je možda potrebno upotrebiti pojačalo snage posle DAC-a da bi pobudio pogon.



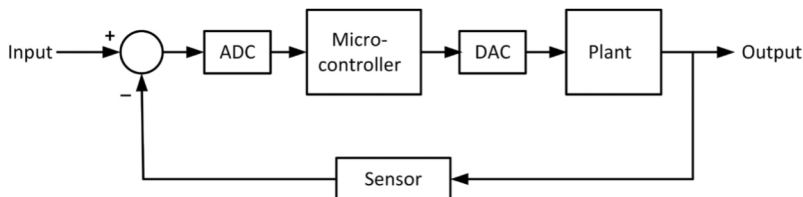
Slika 1.2 Sistem zatvorene petlje [ulaz, greška, kontroler, pogon, izlaz – senzor povratna sprega]

Kako ćete otkriti u sledećem poglavlju većina senzora su analogni uređaji koji daju analogne napone ili imaju strujne izlaze. Ovi senzori se mogu koristiti direktno u analognim sistemima gde su ulazi, kontroler, pogon i izlazi, svi analogne promenljive.

1.2 Mikrokontroler u petlji

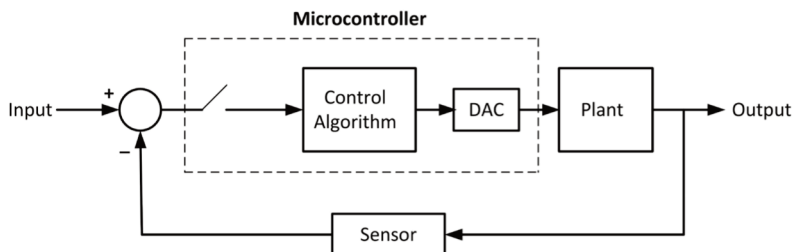
Danas, praktično svi upravljački sistemi su zasnovani na mikrokontrolerima gde se mikrokontroler koristi kao centralna upravljačka jedinica. Neki senzori (npr. temperatura, pritisak, vlažnost itd.) obezbeđuju digitalne izlaze i mogu se direktno spojiti na mikrokontroler. Analogni senzori se ne mogu direktno vezati na mikrokontroler. Potreban je analogno digitalni pretvarač (ADC) koji pretvara analogni signal u digitalni oblik tako da se može dovesti do mikrokontrolera.

Slika 1.3 prikazuje digitalni kontrolni sistem (digitalni upravljački sistem) gde se pretpostavlja da su ulazi i izlazi senzora analogni. Periodično se koristi ADC da pretvara signal greške u digitalni oblik pa se to dovodi na digitalni kontroler koji je obično mikrokontroler. Mikrokontroler koristi upravljački (kontrolni) algoritam (tj. PID algoritam) pa se njegovi izlazi pretvaraju u analogni oblik uz pomoć digitalno analognog pretvarača (DAC) tako da se pobuđuje pogon i izlaz pogona dovodi do željene vrednosti.



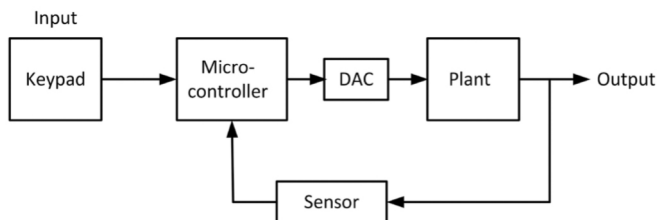
Slika 1.3 Digitalni upravljački sistem

Slika 1.4 prikazuje blok dijagram digitalnog kontrolnog sistema gde je ADC prikazan kao uzorački stepen (sampler). Većina mikrokontrolera u sebi sadrže ADC i DAC module a oni su dati kao deo mikrokontrolera na slici 1.4



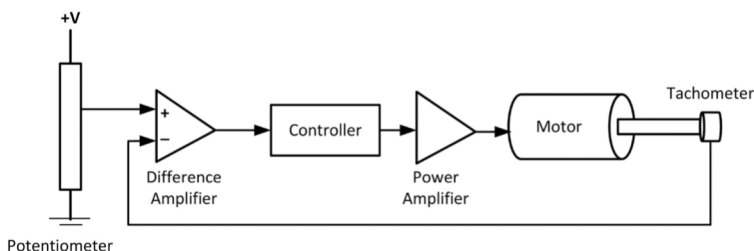
Slika 1.4 Blok dijagram digitalnog kontrolnog sistema

Na slici 1.4 su ulaz i izlaz senzora analogni signali. Promena vrednosti ovog sistema je data na slici 1.5 gde je ulaz digitalan i direktno uključen u kod mikrokontrolera ili ulaz koristi odgovarajući ulazni uređaj kao što je ovde tastatura. Ovde je senzor sa digitalnim izlazom i koristi se direktno spojen na mikrokontroler.



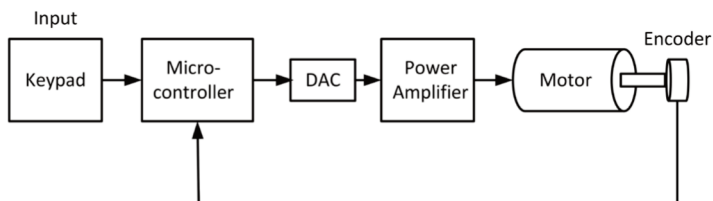
Slika 1.5 Druga varijanta digitalne kontrole

Slika 1.6 prikazuje tipičan analogni upravljački sistem brzine. Ovde se željena brzina postavlja potenciometrom. Brzina motora se meri uz pomoć tahometra i vraća na diferencijalno pojačalo. Izlaz pojačala je signal greške koji je ulaz u analogni kontroler koji se sastoji od operacionih pojačavača. Izlaz kontrolera pobuđuje motor preko pojačala snage da bi se postigla željena brzina.



Slika 1.6 Analogni kontrolni sistem brzine

Slika 1.7 prikazuje digitalni ekvivalent slike 1.6. Ovde se koristi digitalni enkoder da meri brzinu motora i dovodi u mikrokontroler skupa sa željenom brzinom gde se brzina zadaje preko tastature. Mikrokontroler koristi kontrolni algoritam i šalje na izlaz pojačala snage signal u obliku širinske modulacije (PWM) koji zauzvrat obezbeđuje snagu motoru da dostigne zadatu, željenu vrednost brzine.



Slika 1.7 Digitalna kontrola brzine

Pošto se pogonom može upravljati koristeći analogni pristup možete doći u iskušenje da se pitate zašto koristiti digitalnu kontrolu? Godine 1960 računari i mikrokontroleri su bili glomazni i veoma skupio uređaji i njihova upotreba kao digitalnih kontrolera nije bila opravdana. Korišćeni su samo u velikim i skupim pogonima kao što su hemijska procesna postrojenja ili rafinerije nafte. Od uvođenja mikrokontrolera 1970 godine cena i veličina digitalnih kontrolera je dramatično opala. Kao ishod toga, znači pad cena i ostalih digitalnih komponenti kao što su memorije, zanimanje za digitalnu kontrolu se vinulo u nebo poslednjih desetina godina.

Digitalni kontroleri imaju nekoliko prednosti u odnosu na analogne:

- Poboljšan korisnički interfejs. Digitalni kontroleri mogu prikazati parametre sistema i dati na monitoru grafički odziv
- Digitalni kontroleri se mogu konfigurisati da budu prilagodljivi. Kompleksni algoritmi kontrolera se lako mogu ispuniti upotrebom digitalnih kontrolera
- Cena digitalnih kontrolera su niže od odgovarajućih analognih naročito ako je sistemu potrebno dodati dodatne kontrolne petlje
- Podešavanje digitalnih kontrolera je lako. Potrebno je samo izmeniti značajnije parametre u softveru.
- Digitalni kontroleri su mnogo pouzdaniji od analognih i na njih ne utiču faktori okoline kao što je starenje komponenti, tolerancije komponenti itd.
- Digitalni kontroleri se mogu lako modifikovati softverom. Modifikacija analognih kontrolera sa druge strane obično zahteva prežičenje ili upotrebu savim drugih komponenti
- Skoro svi analogni kontroleri se vremenom zamenjuju digitalnim

1.3 Dizajn kontrolnih sistema

Dizajna sistema upravljanja je inženjerski postupak i mora se odvijati sistematski. Glavni koraci dizajna fizičkog upravljačkog sistema se mogu sažeti sledeći koracima:

- Definisanje ulaza i izlaza sistema
- Definisanje promenljivih koje se kontrolišu
- Izvesti matematički model (diferencijalne jednačine) sistema
- Odlučiti da li koristiti analogni ili digitalni sistem
- Izabrati odgovarajući senzor
- Izabrati mikrokontroler (ako se koristi digitalni sistem)
- Izabrati druge komponente kao što je napajanje, operacioni pojačavač, izlazno pojačalo itd.
- Nacrtati blok dijagram sistema
- Opisati kako se koristi kontroler i razviti kontrolni algoritam
- Podesiti parametre izabranog kontrolera
- Izvršiti simulaciju celokupnog sistema (ako je na raspolaganju alat za simulaciju kao što je MATLAB)
- Sklopiti sistem i posmatrati njegovo ponašanje. Ako sistem odgovara željenom, time je projekt rešen. Ukoliko se sa druge strane sistem ne ponaša kao što je zahtevano vratite se da izaberete drugi kontroler ili podesite kontrolne parametre pa ponovo simulirajte i ispitajte sistem.

Poglavlje 2 - Senzori

2.1 Senzori kod računarske kontrole

Senzori su važni delovi svih sistema sa zatvorenom petljom. Senzori su uređaji čiji signali izlaza odgovaraju merenjima (tj oni su funkcija) fizičkih veličina kao što su temperatura, vlažnost, brzina, sila, vibracija, pritisak, pomeraj, ubrzanje, momenat, tok, svetlost ili zvuk. Senzori se koriste u sistemima sa zatvorenom petljom u petlji povratne sprege i obezbeđuju informaciju o stvarnom izlazu iz pogona na kome se nalaze. Naprimera senzori brzine daju signal proporcionalan brzini motora pa se ovaj signal oduzima od željene referentne brzine na ulazu da bi se dobio signal greške. Slično, senzor nivoa tečnosti daje signal proporcionalan nivou tečnosti u posudi. Takvi senzori se koriste da kontrolišu nivo tečnosti u posudi.

Senzori se mogu podeliti u dve grupe: analogni i digitalni. Analogni senzori se široko koriste i njihovi izlazi su analogni signali (napon ili struja) proporcionalni fizičkim veličinama koje se mere. Većina promenljivih okoline u svetu su prirodno analogni, naprimera temperatura, vlažnost, pritisak itd.. Analogni senzor temperature daje direktno analogni napon proporcionalan merenoj temperaturi. Analogni senzori se mogu povezati na mikrokontroler korišćenjem modula ADC pretvarača.

Digitalni senzori nisu baš uobičajeni i daju na izlazu digitalne logičke nivoe koji se mogu direktno spojiti na računar. Prednost korišćenja digitalnih senzora je da su oni mnogo tačniji i stabilniji od analognih i mogu se direktno vezati na računar. Digitalni senzori su obično mnogo skuplji od njihovih analognih ekvivalenata.

Izbor senzora za odgovarajuću primenu zavisi od nekoliko faktora kao što su raspoloživost, cena, tačnost, preciznost, opseg i linearnost senzora. Neki važni parametri senzora su opisani u nastavku

Opseg: Opseg senzora određuje gornju i donju granicu koju senzor može da meri. Naprimera ako je opseg temperature senzora određen kao 10 – 60°C onda bi on trebalo da se koristi samo u tom opsegu merenja.

Rezolucija: Rezolucija senzora određuje najveću izmenu u merenoj vrednosti koja neće uticati na promenu izlaza senzora. Tj. merena vrednost se može izmeniti količinom određenom rezolucijom pre nego što je detektuje senzor. Uopšteno rečeno manja količina je bolja i senzori sa velikim opsegom imaju manju rezoluciju. Na primer temperaturni senzor sa rezolucijom od 0.01°C je bolji od senzora sa rezolucijom od 0.1 °C.

Osetljivost: Osetljivost senzora se definiše kao nagib izlazne karakteristične krive. Još više uopšteno to je minimalni ulaz fizičkog parametra koji će kreirati promenu na izlazu. Na primer tipični temperaturni senzor može imati osetljivost od 1 °C. To znači da se izlazni napon neće promeniti ako promena temperature bude manja od 1 °C.

Tačnost: Tačnost senzora je najveća razlika koja može postojati između stvarne vrednosti i vrednosti na izlazu senzora. Tačnost se može iskazati kao procenat pune skale ili u apsolutnim terminima.

Ponovljivost: Ponovljivost senzora je varijacija izlaznih vrednosti koje se očekuju kada senzor meri istu fizičku veličinu u istim uslovima. Naprimer napona na otporniku se meri nekoliko puta a možete dobiti neznatno različite rezultate.

Linearnost: Očekuje se da idealan senzor ima linearnu prenosnu funkciju tj. izlaz senzora se očekuje da bude tačno proporcionalan merenim vrednostima. Naprimer čip LM35, temperaturni senzor, na izlazu je linearan definisan sa $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$. Znači na 10°C izlazni napon je 100mV , na 20°C izlazni napon je 200mV itd. U praksi svi senzori prikazuju izvesnu količinu nelinearnosti u zavisnosti od proizvođačkih tolerancija i uslova merenja.

Greška offseta: Ova greška senzora se definiše kao izlaz koji postoji iako bi trebalo da je nula. Naprimer izlaz senzora sile bi trebalo da je nula ukoliko nema primenjene sile na senzoru.

Dinamički odziv: Dinamički odziv senzora određuje granice karakteristika senzora kada je podvrgnut sinusnim promenama učestanosti. Naprimer dinamički odziv mikrofona se može izraziti u terminima širine od po 3dB prema njegovom frekventnom odzivu.

Vreme odziva: Senzori ne menjaju svoja izlazna stanja trenutno kada nastupi promena ulaznog parametra. Naprimer, temperaturni senzor neće dati novo očitavanje čim se temperatura promeni nego je potrebno izvesno vreme pre promene na izlazu. Vreme odziva može biti u mikrosekundama, milisekundama ili sekundama u zavisnosti od korišćenog senzora. Senzori sa kraćim vremenom odziva iako su mnogo skuplji ali se mnogo češće koriste.

Samo grejanje: Interne temperature nekih senzora mogu porasti usled dugotrajnog i stalnog vremena korišćenja pa se to naziva samo grejanje senzora. Ono nije poželjno jer može uzrokovati promenu izlaza senzora. Naprimer temperaturni senzor sa osobino samogrejanja može dati pogrešan ili promenljivi (fluktuirajući) izlaz prilikom korišćenja senzora duže vreme.

Fizička veličina: Fizička veličina senzora može biti važna u nekim primenama. Korisnik može proveriti dimenzije senzora pre nego što ga uzme u obzir za korišćenje.

Radni napon: Ovo je takođe važan faktor koji se mora uzeti u obzir pre upotrebe senzora. Trebalo bi da se zna radni napon kao i najmanji i najviši napon koji se dovode na senzor pre njegove upotrebe. Naprimer radni napon određen kao $+3.3\text{ V}$ ne bi smeo da se prekorači.

U podsetniku ovog poglavlja razmatrane su radne karakteristike nekih popularnih senzora.

2.2 Temperaturni senzori

Temperatura je jedna od osnovnih fizičkih promenljivih kod većine kontrola hemijskih i procesnih aplikacija. Tačna i pouzdana merenja temperature su važna u svim kontrolnim aplikacijama. Izbor temperaturnih senzora zavisi od zahtevane tačnosti, temperaturnog opsega, vremena odziva, cene i okoline u kojoj se koristi (odnosno da li u hemijskom, električnom, mehaničkom ili prirodnom okruženju itd.) Temperaturni senzori postoje kao analogni ili digitalni. Oba tipa senzora su kratko opisana u sledećim odeljcima.

2.2.3 Analogni temperaturni senzori

Neki od najčešće korišćenih analognih temperaturnih senzora su: termoparovi, otpornički detektori temperature (RTD), termistori i senzori u obliku čipa (integrisana kola). Tabela 2.1 prikazuje osnovne karakteristike različitih tipova analognih temperaturnih senzora.

Senzor	opseg temperature (°)	Tačnost ($\pm^{\circ}\text{C}$)	cena	robusnost
termopar	-270 do +2600	1	niska	vrlo visoka
RTD	-200 do +600	0.2	srednja	visoka
termistor	-50 do +200	0.2	niska	srednja
integrisano kolo	-40 do +125	1	niska	slaba

Tabela 2.1 Analogni temperaturni senzori

Termoparovi

Termoparovi (slika 2.1) su najbolji za vrlo niska i vrlo visoka merenja temperature. Imaju prednost da su jeftini, vrlo robusni i da se mogu koristiti u hemijskom okruženju. Tipična tačnost termopara je $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Temperaturni senzori tipa termopara se mogu napraviti od različitih provodnih materijala za različite temperaturne opsege i izlazne karakteristike. Tipovi termoparova se identifikuju po slovima. Slika 2.1 prikazuje temperaturne opsege raznih termoparova. Zapazite da se kodovi boja izvoda koriste za identifikaciju termoparova. Materijali koji se koriste za termoparove su prikazani na slici 2.2. Naprimera, jedan često korišćen jeftini termopar je tipa K koji se pravi od spoja hrom/alumel označen zelenom bojom i ima temperaturni opseg od -180°C do $+1300^{\circ}\text{C}$.

Thermocouple Type	Temperature Range (°C)				
	Short Term Use	Continuous Use	Class 1 Tolerance*	Class 2 Tolerance*	Class 3 Tolerance*
Type E	-40 to +900	0 to +800	-40 to +800	-40 to +900	-200 to +40
Type J	-180 to +800	0 to +750	-40 to +750	-40 to +750	N/A
Type K	-180 to +1300	0 to +1100	-40 to +1000	-40 to +1200	-200 to +40
Type N	-270 to +1300	0 to +1100	-40 to +1000	-40 to +1200	-200 to +40
Type R	-50 to +1700	0 to +1600	0 to +1600	0 to +1600	N/A
Type S	-50 to +1750	0 to +1600	0 to +1600	0 to +1600	N/A
Type T	-250 to +400	-185 to +300	-40 to +350	-40 to +350	-200 to +40
Type B	0 to +1820	+200 to +1700	N/A	+600 to +1700	+600 to +1700

Thermocouple Tolerances: IEC 60584-2:1982 / BS EN 60584-2:1993

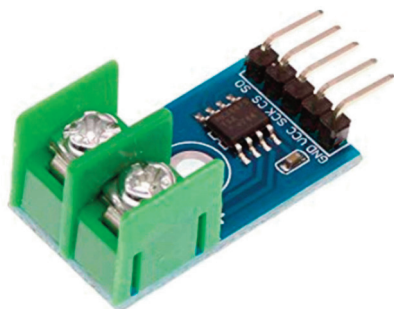
*Thermocouples of this tolerance class can be used outside this range, but no tolerance is defined outside these limits.

Slika 2.1 Tipovi termoparova

Thermo-couple	Material (+ / -)
Type E	Chromel / Constantan
Type J	Iron / Constantan
Type K	Chromel / Alumel
Type N	Nicrosil / Nisil
Type R & Type S	Platinum–Rhodium / Platinum
Type T	Copper / Constantan
Type B	Platinum–Rhodium / Platinum–Rhodium

Slika 2.2 Materijali koji se koriste u različitim termoparovima

Da bi se dobila temperatura iz termopara obično se koristi pojačavač termopara. Izlaz temperature sa pojačavača termopara zavisi od napona na referentnom spoju. Napon na referentnom spoju zavisi od temperaturne razlike između referentnog spoja i termo spoja. Tako je potrebno da znate temperaturu na referentnom spoju. Modul pojačavača termopara MAX6675 (slika 2.3) dolazi sa temperaturnim senzorom na pločici za merenje temperature na referentnom spoju i takođe pojačava mali napon termopara na referentnom spoju tako da ga možete očitati uz pomoć mikrokontrolera.



Slika 2.3 Modul pojačavača termopara MAX6675

Termoparovi se nalaze u raznim oblicima i i formama. Neki senzori su opremljeni sa dvostrukim utičnicama radi lakšeg spajanja na merni uređaj. Slika 2.4 prikazuje neke od najčešće raspoloživih termoparova.



Slika 2.4 Neki termoparovi

RTD

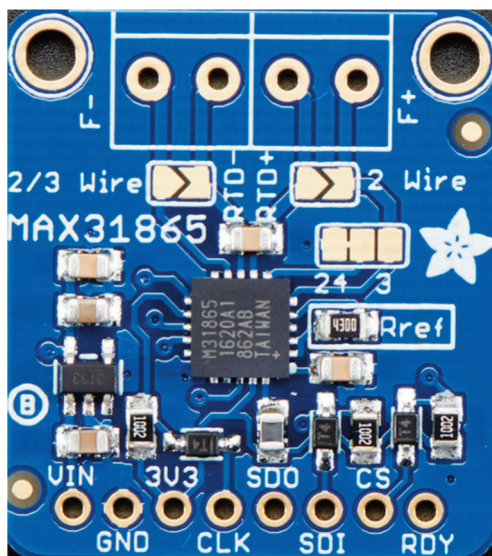
RTD (otpornički temperaturni detektor) su senzori čija se otpornost menja sa temperaturom. Otpornost raste sa porastom temperature. Odnos temperature i otpornosti je dobro poznata i ponovljiva u vremenu. RTD su pasivni uređaji i ne daju nikakav izlaz. Obično otpornost RTD-a se meri prolaskom slabe električne struje kroz njega i zatim merenja napona na krajevima senzora. Mora se povesti računa da ne teče veća struja jer može nastupiti samo zagrevanje senzora. Struja koja teče kroz senzor je tipično 1 mA ili manja. Slika 2.5 prikazuje neke RTD senzore. RTD imaju izvanrednu tačnost u širokom temperaturnom opsegu i ponekad imaju tačnost bolju od 0.001°C . Druga prednost RTD-a je da im je pomak manji od $0.1^{\circ}\text{C}/\text{godišnje}$.



Slika 2.5 Neki RTD senzori

Da bi postigli visoku stabilnost i tačnost RTD senzori moraju biti bez zagađenja. Ispod 250 °C kontaminacija nije problem ali iznad tih temperatura potrebne su specijalne proizvodne tehnike da bi smanjile kontaminaciju. RTD senzori se obično prave u dva oblika ; namotana žica ili tanki film. Žičani RTD su napravljeni namotavanjem vrlo fine niti platinaste žice u obliku kalema oko neprovodnog materijala sve dok se ne dobije zahtevana otpornost. RTD od tankog filma se pravi slaganjem slojeva platine u obliku otpornika na keramičkom substratu. Većina obično korišćenih RTD koriste standard IEC 751 koji se bazira na platini otpornosti od 100 Ohm na 0°C.

Za visoku tačnost se preporučuje modul pretvarača RTD u digitalni oblik kao što je modul MAX31865 (slika 2.6) Ovaj čip je optimizovan za platinska RTD. Tačni referentni otpornik se koristi za podešavanje osetljivosti RTD. ADC na čipu vraća odnos RTD otpornosti prema referentnoj otpornosti u digitalnom obliku. Znajući referentnu otpornost lako se može izračunati RTD otpornost i time merena temperatura bilo sa tabele temperature i otpornosti ili upotrebom funkcije iz biblioteke.



Slika 2.6 RTD pretvarački modul MAX31865

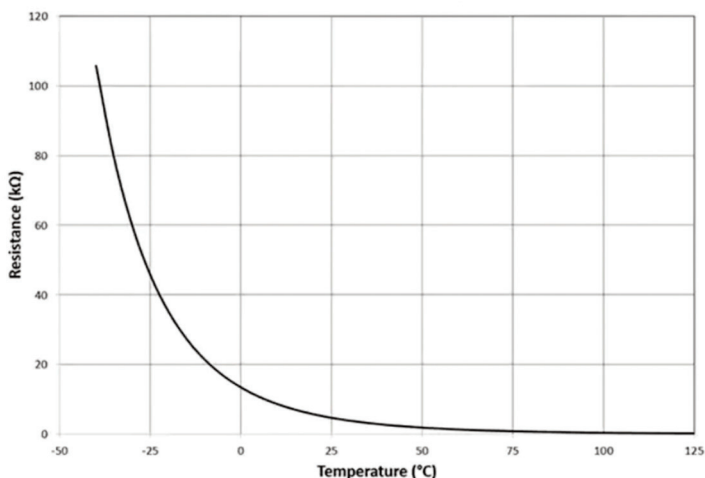
Termistori

Ime **termistor** je izvedeno iz reči **`thermal`** i **`resistor`** (termički otpornik). Termistori su pasivni poluprovodnici temperaturno osetljivi koji ispoljavaju veliku promenu električne otpornosti prilikom malih izmena temperature tela termistora. Termistori se rade u različitim oblicima i veličinama (slika 2.7), kao perle, diskovi, podloške, slojevi i čipovi koji su najčešće korišćeni tipovi termistorskih senzora.



Slika 2.7 Različiti oblici termistora

Termistori obično postoje u dva tipa: sa negativnim temperaturnim koeficijentom (NTC) ili pozitivnim temperaturnim koeficijentom (PTC). PTC termistori se obično koriste kod snažnih kola za zaštitu od strujnih udara. NTC termistori iskazuju mnoštvo poželjnih osobina za merenje temperature. Njihov električni otpor opada sa porastom temperature (slika 2.8) a odnos otpornosti i temperature je veoma nelinearan. Otpornost termistora se odnosi na referentnu temperaturu od 25°C i za većinu aplikacija otpornost na ovoj temperaturi je između 100 Ohm i 100 kOhm.



Slika 2.8 Tipična R/T karakteristika termistora

Prednosti termistora su:

Osetljivost: Prednost termistora u odnosu na termopar i RTD su njihove velike promene sa temperaturom koje iznose tipično -5% po °C.

Male dimenzija: Termistori su mali i pravljeni za brz odziv temperaturnih promena. Ova osobina je veoma važna kod upravljačkih sistema sa povratnom spregom po temperaturi kad se zahteva brz odziv.

Izdržljivost: Većina termistora su izdržljiva i mogu izdržati mehaničke i termičke udare i vibracije bolje od ostalih tipova temperaturnih senzora

Daljinska merenja: Termistori se mogu koristiti da osele temperature na udaljenim lokacijama preko dugačkih kablova jer otpornost dugog kabla je beznačajna u odnosu na relativno visoku otpornost termistora.

Niska cena: Termistori koštaju manje od većine ostalih tipova temperaturnih senzora.

Izmenljivost: Termistori se mogu praviti sa veoma malim tolerancijama. Kao posledicu imamo mogućnost zamene termistora bez ponovnog kalibrisanja mernog sistema.

Termistori mogu patiti od problema samogrejanja kao rezultat prolaska struje kroz njih. Kada se termistor sam zagreva očitavanja otpornosti opadaju relativno u odnosu na pravu vrednost uzrokujući greške u merenjima temperature. Zato je važno smanjiti električnu struju kroz termistor.

Termistori se mogu koristiti u kolima redno vezani sa poznatim tačnim fiksnim otpornicima. Merenjem napona na termistoru možete izračunati otpornost. S druge strane za merenje otpornosti termistora se može koristiti konstantna struja, mosni spoj ili kola sa operacionim pojačavačima. Posle nalaženja otpornosti termistora možete izračunati temperaturu uz pomoć tabela (ako postoje) ili bibliotečkih funkcija (ako postoje) ili korišćenjem standarda Steinhart-Hart jednačine datom dole:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \left(\frac{R}{R_0} \right)$$

ili

$$T = \frac{1}{1/B \ln(R/R_0) + 1/T_0}$$

Gde je T_0 sobna temperatura u Kelvinima (298.15), B temperaturna konstanta termistora R_0 je termistorska otpornost na sobnoj temperaturi a R izmerena otpornost termistora. Dole je dat primer.

Primer

Temperaturna konstanta termistora $B=2910$. Njegova otpornost na sobnoj temperaturi (25°C) je 1 kOhm. Ovaj termistor je u električnom kolu koje meri temperaturu i nađeno je da je otpornost termistora 800 Ohm. Računanje izmerene temperature

Rešenje

Ovde je poznato $B=2910$, $T_0=298,15$, $R=800$ a $R_0=1000$ Ohm

$$T = \frac{1}{1/2910 \ln(800/1000) + 1/298.15} = 310.24$$

Ili $T = 310,24 - 273,15 = 37,09 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Integrisana kola

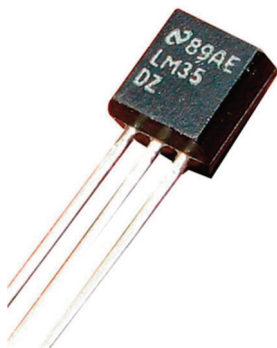
Integrisana kola analognih senzora su poluprovodnički uređaji koji se u osnovi razlikuju od ostalih senzora:

- Imaju male fizičke dimenzije
- Izlazi su im linearni
- Temperaturni opseg je relativno ograničen
- Cena im je relativno niska
- Obično im nedostaje dobar termički kontakt sa okolinom pa kao ishod teže ih je upotrebiti sem za merenje temperature vazduha
- Potrebno je napajanje za rad ovih senzora

Analogni integrisani senzori mogu imati naponski ili strujni izlaz. U ovom poglavlju ćete videti karakteristike nekih najčešće korišćenih senzora.

LM35DZ

Ovo je popularni 3 pinški čip, temperaturni senzor (slika 2.9) čiji je naponski izlaz linearan dat sa $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Naprimera na 10°C izlazni napon je 100 mV a na 20°C je 200 mV itd. Ovaj senzor ima opseg od 0°C do $+100^\circ\text{C}$ (verzija CZ senzora ima širi temperaturni opseg od -20°C do $+120^\circ\text{C}$). Tačnost senzora je $\pm 1.5^\circ\text{C}$ a radni napon od 4 do 30 V.



Slika 2.9 Temperaturni senzor LM35DZ

Senzor LM34 je sličan LM35DZ ali meri u stepenima Farenhajta. LM134, AD590 i AD592 su temperaturni senzori sa strujnim izlazom koji je direktno proporcionalan sa merenom temperaturom. Na primer izlaz AD590 (slika 2.10) daje $1 \mu\text{A}/^\circ\text{K}$.



Slika 2.10 temperaturni senzor AD590

TMP36

Ovo je drugi popularni u čip integrisani analogni senzor temperature. Veličina konfiguracija senzora je ista kao na slici 2.9. Izlaz TMP36 je linearan sa merenom temperaturom i dat sa $V_0 - 500/10$ gde je V_0 izlazni napon senzora u milivoltima.

2.2 Digitalni temperaturni senzori

Ovi senzori daju digitalni izlazni signal pa se mogu direktno spojiti na mikrokontroler. Izlazi su nestandardni a izmerena temperatura se može dobiti iz softvera uz odgovarajući algoritam. Tabela 2.2 daje spisak nekih popularnih temperaturnih senzora sa digitalnim izlazom.

Senzor	Izlaz	Max. greška	Temperaturni opseg
LM75	I2C	$\pm 3^\circ\text{C}$	-55°C do $+125^\circ\text{C}$
TMP03	PWM	$\pm 4^\circ\text{C}$	-25°C do $+100^\circ\text{C}$
DS18B20	1 žični	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	-55°C do $+125^\circ\text{C}$
AD7814	SPI	$\pm 2^\circ\text{C}$	-55°C do $+125^\circ\text{C}$
MAX6575	1 žični	$\pm 0.8^\circ\text{C}$	-40°C do $+125^\circ\text{C}$
DHT11	Serijski 1 žični	$\pm 2^\circ\text{C}$	0°C do $+50^\circ\text{C}$
DHT22	Serijski 1 žični	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	-40°C do $+80^\circ\text{C}$

Tabela 2.2 Neki temperaturni senzori sa digitalnim izlazima

DHT11 i DHT22 (slika 2.11) su sa tri izvoda i veoma popularni temperaturni senzori sa digitalnim izlazima. Oba senzora mogu meriti temperature kao i relativnu vlažnost. Arduino i Raspberry Pi biblioteke su na raspolaganju za oba senzora za jednostavno očitavanje temperature i vlažnosti.